

中国极化电子—离子对撞机

梁羽铁^{1,2} 杨一玻^{2,3} 赵宇翔^{1,2,†}

(1 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

(3 中国科学院理论物理研究所 中国科学院理论物理前沿重点实验室 北京 100190)

2020-07-03 收到

† email: yxzhao@impcas.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20200804

The Electron-Ion Collider in China

LIANG Yu-Tie^{1,2} YANG Yi-Bo^{2,3} ZHAO Yu-Xiang^{1,2,†}

(1 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 CAS Key Laboratory of Theoretical Physics, Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 电磁相互作用把质子与电子束缚起来, 形成氢原子。人类对于电磁相互作用的深刻认识发展出智能手机和信息技术, 给日常生活带来了极大的便利。相比之下, 夸克和胶子如何被强相互作用束缚从而形成质子与中子, 人类还缺乏充分的认识。因此, 全球的中高能核物理学家提出了建设未来高精度极化电子—离子对撞机以对其进行更深入的研究。文章主要介绍中国极化电子—离子对撞机实验上的物理问题, 以及量子色动力学格点计算在这些物理研究中的重要作用。

关键词 电子—离子对撞机, 量子色动力学, 核子结构, 核子自旋结构, 核介质效应, 奇特强子态, 核子质量

Abstract Our understanding of the electromagnetic force, which binds together a proton and an electron to form a hydrogen atom, has given birth to the development of the smartphone as well as cutting-edge information technology. It has revolutionized our daily life. On the other hand, we know little about how quarks and gluons are confined by the strong interaction force within a proton or neutron, or about their complicated dynamics inside a nucleon. Therefore, nuclear physicists around the world have proposed to build a polarized electron-ion collider to further research in this field. The design of the Electron-Ion Collider in China (EicC) as well as several key physics topics will be discussed in this article, as well as the lattice QCD calculation and its importance in nucleon structure studies.

Keywords Electron-Ion Collider, quantum chromodynamics, nucleon structure, nucleon spin structure, nuclear effects, exotic hadronic states, nucleon mass structure

1 极大宇宙与极小核子

宇宙之大, 给了古今中外多少文人墨客无限的遐想, 也令哲学家及天文学家们深深着迷; 核子之小, 与尘埃相比如同沧海之一粟, 钻入核子

内部, 它又像宇宙一样丰富多彩, 无数核物理学家都想揭开它的神秘面纱。“极大宇宙”与“极小核子”之间有着千丝万缕的联系。

宇宙大爆炸理论似乎解释了“极小”与“极大”之间的联系: 宇宙在诞生初期是由均匀且各

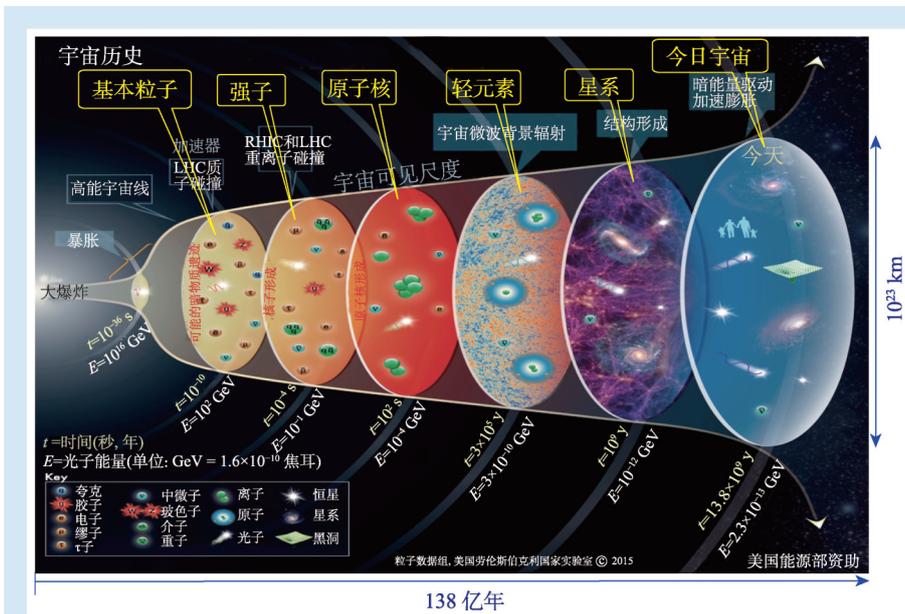


图1 宇宙大爆炸及其演化图(图片来自 Particle Data Group)^[1]

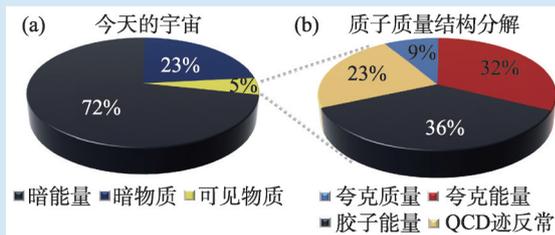


图2 (a)今天的宇宙暗能量、暗物质、可见物质的组成比例；(b)可见物质基本组成成分——核子的不同质量来源及其所占的比例。与可见物质仅占宇宙5%相似，可见物质质量中直接与希格斯机制相关的夸克质量部分仅占9%左右。格点QCD的计算能够精确给出包括夸克动能、胶子动能以及QCD迹反常等其余部分对可见物质质量的贡献^[2]

向同性的高密高温高压物质构成的，并在极早期发生了非常快速的膨胀和冷却，大约在膨胀进行到 $10^{-37} s$ 时，产生了一种相变使宇宙发生暴胀，随后产生了基本粒子、强子、原子核、元素、星系直到今天的宇宙，如图1所示。如今，在大的尺度上，天文学家已经可以观测到 $10^{26} m$ 范围内的宇宙；而在小尺度上，粒子物理与核物理学家发现了组成可见物质的基本成分核子，包括质子和中子，它们的大小只有 $10^{-15} m$ 而且具有复杂的夸克胶子内部结构。如图2所示，宇宙在极大尺度与极小尺度具有某种相似性：可见物质在宇宙中的占比很小，而在可见物质质量(主要来源于核子的质量)中直接与希格斯机制相关的质量贡献也

很小；夸克与胶子的动能之和对核子质量的贡献超过了一半，而暗物质在宇宙中也有可观的占比。

欲了解宇宙演化的奥妙，必须首先搞清楚宇宙中可见物质主要组成部分——核子的基本组成及其内部的动力学结构。现代粒子物理标准模型告诉我们，描述强子内部结构的基本理论是量子色动力学(QCD)，而基本自由度是夸克和胶子。电子—离子对撞机将是人类认识核子内部世界“最精密的显微镜”。

2019年，美国能源部公布决定在布鲁克海文(Brookhaven)国家实验室原有强子对撞机的基础上，建造未来电子—离子对撞机^[3]。在此之前，这个科学项目已经在美国和欧洲论证了整整20年。美国电子—离子对撞机的研究重点之一就是研究胶子对核子质量和自旋起源的贡献。与此同时，国内核物理科学家们也在讨论建造一个中国电子—离子对撞机^[4]，该装置的研究重点将聚焦在夸克对核子结构的贡献。

本文首先简要描述核子结构实验研究的历史与现状，然后阐述量子色动力学格点计算如何从第一性原理出发研究核子结构，最后介绍中国极化电子—离子对撞机上的探测器设计及其重要物理。

2 核子结构实验研究的历史与现状

在人类探索物质基本组成的过程中，“原子”概念的提出具有浓重的哲学色彩。在希腊语中“原子”意为“不可切分”，代表了当时人们对于物质世界是否无穷可分的哲学思考。19世纪末期，人们发现原子可能有内部结构，也就是说是可分的。为了弄清原子的结构，1909年卢瑟福设计了低能 α 粒子轰击极薄金箔的实验(图3(a))，如

今人们称之为“卢瑟福散射”实验。在那个时代，原子通常被认为类似于梅子布丁(也被称为“汤姆孙”模型)，负电荷(梅子)分散于正电荷的圆球(布丁)。假若梅子布丁模型是正确的，由于正电荷完全散开，而不是集中于一个核心里，库仑势的变化不会很大，带正电的 α 粒子通过原子时，其移动方向应该只会有一小角度偏差。然而，卢瑟福得到的实验结果非常令人吃惊，大约每8000个 α 粒子，就有一个粒子的移动方向会有很大角度的偏差(甚至超过 90°)；而其他粒子都直直地通过金箔纸，偏差几乎在 2° — 3° 以内，甚至几乎没有偏差。根据实验结果，卢瑟福断定，原子大多数的质量和正电荷都集中于一个很小的区域(这个区域后来被称作“原子核”)；电子则分布在此区域的外面。当一个 α 粒子移动到非常接近原子核的地方，它就会受到很强烈的排斥，并以大角度反弹。原子核的小尺寸解释了为什么只有极少数的 α 粒子被这样排斥。从卢瑟福散射实验结果，再到后面玻尔原子模型的提出，才逐渐发展出今天人们对原子结构的新认知。

如果将卢瑟福散射中的 α 入射粒子换成电子，让几百MeV量级的电子通过原子核或者核子的库仑场，末态原子核或者核子仍保持完整状态，这种过程被称为弹性散射(图3(b))。一般认为电子是点粒子，如果假设原子核或者核子是一个带电点粒子，可以严格计算电子经由电磁相互作用弹性散射的末态分布，如果偏离这种分布，说明提供库仑场的原子核或者核子存在一定的电荷分布结构，该结构由电磁形状因子描述。Robert Hofstadter 因其在电子—原子核弹性散射的先驱性研究以及由此获得核子结构信息被授予1961年诺贝尔物理学奖。另外，由于电

子是费米子，其自旋为 $1/2$ ，如果将入射电子自旋方向限定在垂直于散射平面的某一方向上(极化)，在末态两处完全对称的角度上会探测到数目不同的散射电子(Mott 散射)，这是由于极化电子在原子核提供的库仑场中自旋与轨道角动量耦合带来的效应。

当电子能量升高，突破原子核外部的库仑场打入原子核甚至核子(质子与中子)内部，将其打碎，这种过程称为深度非弹性散射(图3(c))。斯坦福直线加速器中心(Stanford Linear Accelerator Center, SLAC)正是利用这个过程给出核子存在更深层次内部结构的直接证据，开启了人类基于大型加速器系统利用轻子—核子散射过程研究可见物质深层次结构的新时代。电子参与电磁及弱相互作用的过程可以被精确计算(图4)，因此，电子—离子深度非弹性散射过程是一个利用轻子(量子电动力学)作为探针来研究核子内部结构(量子色动力学)的“黄金”实验手段。

图5列出了一些与核子结构研究相关的重要实验及其运行时间。下面将对其中部分实验装置

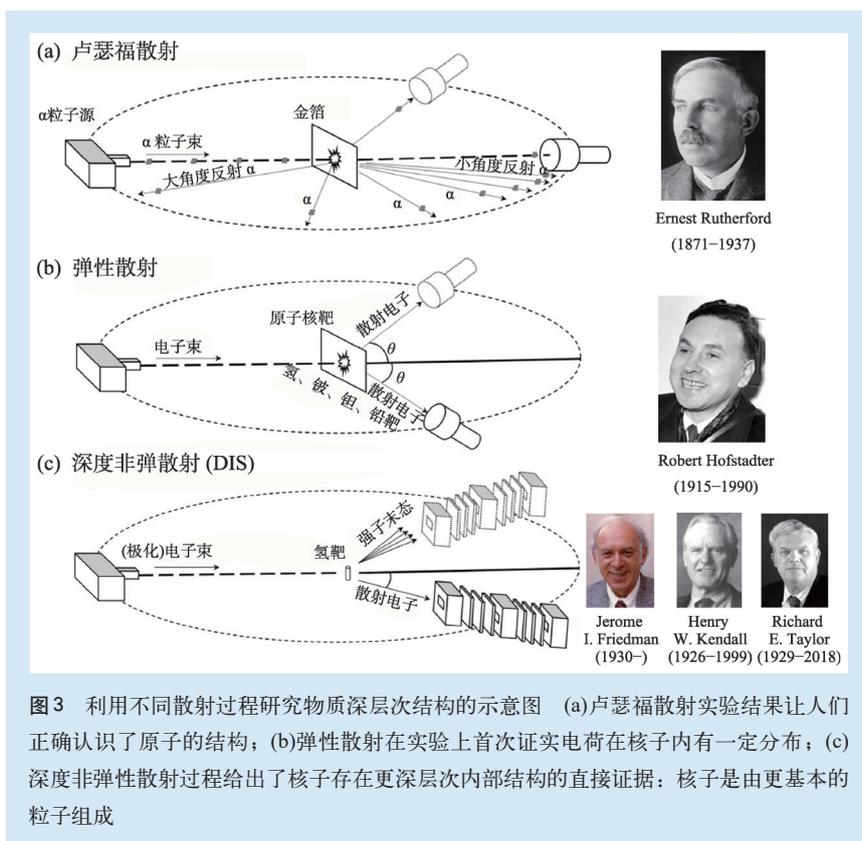


图3 利用不同散射过程研究物质深层次结构的示意图 (a)卢瑟福散射实验结果让人们正确认识了原子的结构；(b)弹性散射在实验上首次证实电荷在核子内有一定分布；(c)深度非弹性散射过程给出了核子存在更深层次内部结构的直接证据：核子是由更基本的粒子组成

进行简要介绍。

2.1 斯坦福直线加速器中心(SLAC)

美国斯坦福直线加速器中心(SLAC)成立于1962年,其主要的电子加速器长达两英里,为当时最长的直线加速器,于1966年首次启动。作为试运行,有三项实验是由SLAC—MIT—Caltech联合提出:电子—质子弹性散射、正电子—质子弹性散射、电子—质子非弹性散射。弹性散射的实验结果与预期一致,进一步证实了已知的结论。随后,Caltech成员决定退出联合小组,SLAC—MIT团队继续实验,进行电子—质子非弹性散射的深入研究,实验上测量到质子的3个共振态。随着电子束流能量进一步提高(最高可达20 GeV),电子—质子散射能进入到深度非弹性散射区域。此时,出乎预料地,实验结果发现末态散射电子在大角度上的产额与电子—质子弹性散射过程相比高出至少一个量级。进一步的实验数据发现了所谓的“Bjorken Scaling”现象,表明电

子—质子深度非弹性散射可以理解成电子和质子内自由的点粒子——“部分子”的弹性散射。由此,质子是由更基本的粒子组成及质子具有深层次的内部结构慢慢被人们接受。Jerome I. Friedman、Henry W. Kendall、Richard E. Taylor 由于致力于推动SLAC电子—质子(中子)深度非弹性散射的先驱性研究获得了1990年诺贝尔奖^[5]。

SLAC的深度非弹性散射实验触发了全世界基于轻子束流的固定靶实验,其中包括基于缪子束流的固定靶实验,例如,美国费米实验室的BFP实验,欧洲核子中心CERN的BCDMS、EMC、NMC实验;以及基于中微子束流的固定靶实验,例如,美国费米实验室的CCFRW、NuTeV实验,CERN的CDHSW实验。这些实验利用不同的轻子探针来扫描核子内部结构,人们逐渐认识到核子并不只是由简单的3个“价夸克”组成,而是具有复杂的价夸克、海夸克、胶子内部结构,并由此发现了一系列新的科学现象,例如,奇异夸克的数密度(strange quark density)远小于轻反夸克(\bar{u} , \bar{d})的数密度;在质子中 \bar{d} 夸克似乎比 \bar{u} 夸克更多;原子核中的夸克分布与核子中的夸克分布不一样等。随着极化技术的发展,实验中引入极化的束流和极化靶后,人们观察到更多新奇的效应,至此,核子结构世界的新大门才刚刚打开。

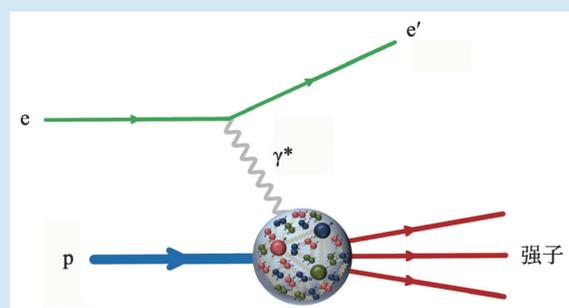


图4 电子—质子深度非弹性散射示意图,该过程利用电子作为探针可以深入研究核子内部结构

2.2 HERA

德国HERA上电子—质子对撞机实验的运行^[6],将核子结构研究的运动学覆盖范围扩大了两个量级。基于HERA大型加速器的3个实验H1、ZEUS、HERMES

在15年间收集了核子结构研究的海量数据,造就了一个“HERA传奇”(HERA legacy):物理学家利用H1和ZEUS所有的深度非弹性散射的数据进行了QCD拟合,得到各个味道的部分子分布函数HERAPDF,提供了一个独特的平台研究核子内夸克以及胶子的分布;利

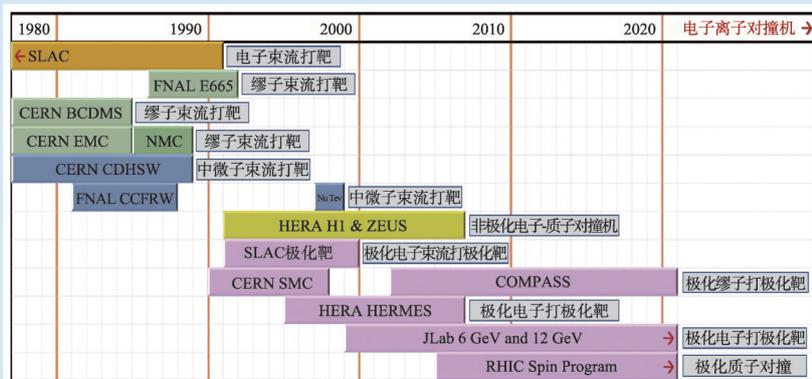


图5 现代核子结构研究的固定靶及对撞机实验

用电子—质子散射过程系统地研究了中性流和带电流，在同一个实验中验证了电弱相互作用统一理论；首次在深度非弹性散射实验中发现10%的数据呈现出一种新的衍射事例——质子保持完整的同时产生一系列的强子末态；等等。HERMES实验利用极化束流拓展了HERA上非极化核子内部结构的研究，在夸克和胶子尺度上研究核子1/2自旋，成为早期研究核子自旋结构的实验之一。

2.3 欧洲核子中心(CERN)

1978年，欧洲核子中心CERN通过引出SPS质子加速器打靶产生次级pion束流，利用其衰变成功产生缪子束流^[7](编号M2，最高能量达到300 GeV)。基于该束流，1978年到1985年之间，EMC (European Muon Collaboration) 和BCDMS (Bologna-CERN-Dubna-Munich-Saclay)两个实验利用液态氢靶、氘靶、固体核靶同时从事深度非弹性散射研究，随后BCDMS实验关停，EMC实验升级成NMC实验(1986—1989年)和SMC实验(1992—1996年)(首字母N代表New，S代表Spin)。早期的实验主要同SLAC实验一起研究“Bjorken scaling”以及利用其破缺来检验微扰QCD、测量强相互作用耦合常数。在EMC和NMC上利用不同的固态核靶进行了一系列核介质效应的研究，发现了著名的“EMC效应”：原子核中的部分子分布与核子中的部分子分布不一样。EMC合作组利用极化的束流和极化靶对撞来研究核子自旋结构时发现，所有的夸克自旋求和远远小于核子1/2自旋^[8]，这与当时诺贝尔奖获得者Gell-Mann的夸克模型给出的预言不符，导致了所谓的质子“自旋危机”。原子核相关的“EMC效应”及核子内部自旋结构这两个物理问题，至今也没有明确的答案。随后SMC实验升级成COMPASS(COMMON Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy)实验继续从事核子结构研究，同时扩展到强子谱的研究。

2.4 杰弗逊实验室(JLab)

美国杰弗逊实验室(Thomas Jefferson National Accelerator Facility, JLab)的加速器于1995年出束运行并开始进行打靶实验^[9]。2015年以前，它包含高亮度的超导直线电子加速器(“跑道型”，只在直线段加速)和3个实验大厅(Hall A, B, C)。2012—2015年，电子束流能量由最高6 GeV升级到最高12 GeV，并建成新的实验大厅Hall D专门从事光子打靶实验。JLab同时提供高性能极化电子束流和极化靶，是研究核子自旋结构，尤其是在价夸克区域研究核子三维自旋结构的理想场所。由于能够精准控制电子束流极化方向，还可以利用宇称不守恒过程来精确检验标准模型或者从事新物理的研究。另外，在电子与不同原子核的打靶实验中，可以系统研究核介质效应及原子核内核子之间的短程关联。

2.5 布鲁克海文实验室(BNL)

虽然布鲁克海文实验室的主要物理目标是利用重离子对撞来研究核物质相结构，但是随着极化质子束流技术的发展，在该实验室(STAR和PHENIX实验)同样可以进行核子自旋结构的相关研究^[10]。值得一提的是，利用两个均纵向极化的质子对撞，测量 π^0 或强子喷注(Jet)产生的双自旋依赖不对称性，可以得到 $0.05 < x < 0.2$ 区间胶子对核子自旋的贡献，该研究是目前为止对胶子自旋最有效的精确测量。同时，利用纵向极化质子同非极化质子对撞，测量W玻色子末态产额的单自旋依赖不对称性，可以研究极化质子内海夸克的自旋分布。另外，利用横向极化的质子束流还可以研究核子三维自旋结构。

2.6 电子—离子对撞机(EIC)

经过近半个世纪的核子结构研究，物理学家们发现，要深入理解核子内部结构，需要一个高亮度的电子—离子对撞装置(Electron—Ion Collider, EIC)。该装置要能够提供电子/离子双极化的束

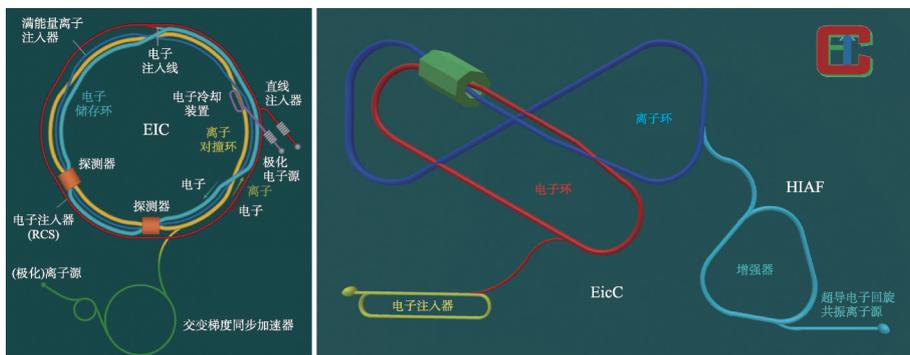


图6 美国EIC与中国EicC加速器设计示意图(未按比例尺作图)^[3, 4]。两个对撞机都需要极化的电子束流和极化的质子及轻核束流

流, 并具备相应高的质心系能量以及大接受度的探测器系统。其主要目标之一就是在夸克—胶子层面理解质子的质量及自旋。如今, 美国将依托布鲁克海文国家实验室建设EIC, 中国提出依托广东惠州在建的强流重离子加速器装置建设EicC (Electron ion collider in China, EicC), 欧洲也在讨论利用大型强子对撞机LHC来建造一个超高能量的电子—离子对撞机LHeC。美国及中国的EIC加速器设计示意图如图6所示。尽管由于不同EIC设计的能区不同, 物理研究侧重点也稍有差别, 但是全球中高能核物理领域已经达成共识: EIC及其物理研究必将是下一个强相互作用相关研究的前沿。

3 核子结构的量子色动力学格点计算

在人类认识物理世界的漫长历程中, 理论和实验研究从来都是相辅相成的。理论的工作从实验结果提炼更为基本的规律的同时, 也会提出新的预言。量子色动力学(QCD)是研究夸克如何在胶子的束缚下构成强子的基本理论。这一理论起源于杨振宁先生和米尔斯教授提出的非阿贝尔规范场论, 并因为格罗斯、玻利策和维尔切克发现其在极小尺度(质子半径的几分之一)上的“渐进自由”特性而受到广泛关注。相关的预言在日益精确的加速器实验中得到广泛的验证, 格罗斯等人也因此获得2004年的诺贝尔物理学奖。与量子电动力学的媒介粒子——随处可见的光(电磁

波)不同, 量子色动力学的媒介粒子——胶子, 像是潜藏在虚空中的暗影, 难以直接观测而又对可见世界拥有巨大的影响力, 例如它主导着可见物质的质量(图2)。作为一个简单的图像, 胶子与夸克的相互作用会使夸克的运动在核子半径的尺度上变慢, 最终束缚在核子中; 但是以

推导解析的数学公式的方式, 从QCD出发将这一图像转化为精确的预言极其困难, 至今依然是美国克雷(CLAY)数学研究所在本世纪初悬赏100万美金的七大千禧年数学难题之一^[11]。

虽然在解析推导的方向上进展有限, 但是这并不意味着人类完全束手无策。1982年诺贝尔物理学奖得主威尔森教授在70年代发展了将量子色动力学重新表述为在四维格子上的离散理论的框架: 格点量子色动力学(下文中简称格点)。如图7所示, 物理学家基于这一框架, 将充满了胶子的真空定义在了三维空间加虚数时间中的四维网格之上, 可以按照量子力学的基本原理产生大量可能的真空构型。然后通过计算夸克与胶子在这些真空构型中的统计关联性(传播子), 就可以抽取出真实世界中QCD在核子尺度的性质。除了QCD, 物理世界里其他强耦合系统, 也能从格点方法“将无限化为有限、集中解决主要矛盾”的思想中获益。比如, 在对引力相互作用的精确计算中, 数值相对论计算就采取了将三维空间离散化为自适应的多尺度格子, 然后按照爱因斯坦方程进行实时演化的方案; 在凝聚态中, 通过将哈密顿量在虚时方向进行展开, 并引入圈演化的世界线方法, 格点计算也能对量子多体系统特别是量子相变以及临界行为进行模拟。

作为一个统计问题, 将计算的统计误差缩小一半, 需要至少4倍的统计量也就是4倍的计算开销; 而格子的边长增加一倍或者将格距离缩小一倍, 更会带来在计算资源上16倍以上的开销。更

加严峻的是，计算夸克性质所需的计算资源，随着质量降低急剧增长。以80年代的格点算法和计算机性能，将质子质量的计算误差降低到1%的水平，是数万年也无法达成的目标。因而威尔森教授在80年代断言，格点模拟的研究已经进入了不见天日的地下室，并不是一个实践上可行的方案。

然而，指数提升的超级计算机性能，可以非常直接地缓解格点计算的困难。在格点模拟诞生的时代，全世界的计算性能的总和还比不上今天个人就能购置的虚拟货币生成设备；而当代的格点模拟，已经是一个每年消耗全球顶尖超级计算机资源的百分之几，产生并处理PB级数据的活跃领域。2009年世界格点大会在北京大学举办时，图形处理器(GPU)计算对于格点模拟还是新生事物；而在全国同行的支持下，中国科学院近代物理研究所和华南师范大学建设的GPU集群，将于2020年全面投入使用(图8)，性能可达每秒1千万亿次浮点运算。这是继湖南师范大学、华中师范大学、中国科学院高能物理研究所以及理论物理研究所的GPU集群之后，又一个能为格点计算尤其是与核子结构相关的格点计算提供强力支持的集群。

而另一方面，格点物理学家也没有静待计算性能满足需求。格点物理学家早在20世纪90年代，就在正反夸克对不影响真空性质的粗略假设下，得到与十多年之后完整计算只相差百分之几的初步计算结果。而在21世纪初，格点物理学家进一步发现，可以通过先行计算夸克的长距离关联，来推倒淬火近似与完整QCD计算之间的“柏林墙”，最终突破威尔森教授的断言。目前格点计算不仅能将质子质量的计算误差降低到1%或更低的水平，甚至能够精确计算质子与中子的质量差，误差仅为质子质量的万分之三。

从基态强子的质量计算更进一步，格点计算可以用于考察研究其内部结构。质量和自旋是粒

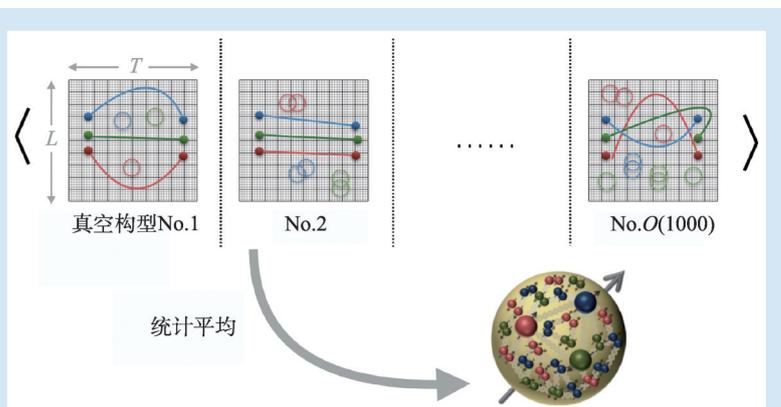


图7 格点QCD计算示意图：首先产生 $O(1000)$ 种可能的长度为虚时间长度 T ，宽度为空间尺度 L 的真空构型(灰色网格，实际计算中空间为三维，格子体积为 L^3)，其中胶子定义在网格的边上(黑色网格线)而正反夸克对呈现为闭环(灰色网格上红/绿/蓝三色圆圈)。然后在这些真空构型上计算核子中三个夸克的在虚时间 T 方向的传播(网格上有端点的三色曲线)，最终从其统计平均值中抽取真实世界中核子(图下半部分包含了各色夸克的金色圆球)的性质



图8 正在建设的南方核科学计算中心

子的基本属性，但是对于质子这样由夸克和胶子复合而成的粒子，其质量与自旋如何溯源到夸克和胶子，是QCD研究中的一个挑战。深度非弹性散射(DIS)的实验结果表明，夸克自旋对质子自旋的贡献仅为约30%，和传统夸克模型认为质子自旋完全来源于夸克自旋的图像截然不同；而QCD也预言了，胶子的标度反常效应在手征极限下才是质子质量的主要来源。通过研究质子与胶子在相同真空构型上的统计关联，格点QCD可以精确地揭示标度反常这一量子效应如何从无到有让质子获得质量，而三角量子反常效应又是如何让胶子具有了对质子自旋可观的贡献。同时，格点QCD也能类似地计算质子与奇异夸克甚至粲、底夸克的统计关联，确定这些在真空中转瞬即逝的

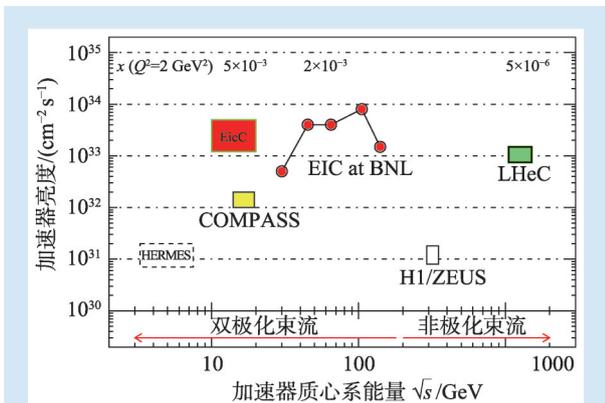


图9 全球主要电子—离子对撞机亮度及质心系能量分布

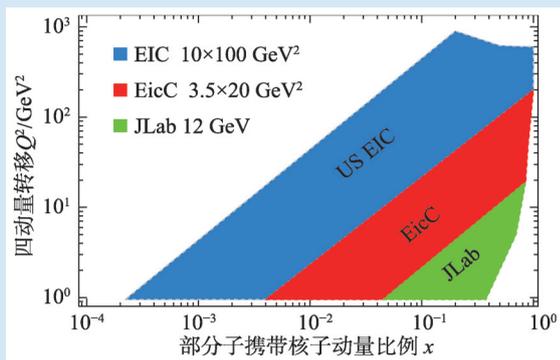


图10 JLab 固定靶实验与 EicC、EIC 对撞机实验运动学覆盖区域

正反夸克对是否也会影响核子的基本性质。

从另一个角度来看，单核子的计算也可以拓展到多核子体系。目前国际前沿的LQCD核结构研究主要集中在双重子系统的结合能上。其中美国研究组NPLQCD通过计算体系的能谱抽取散射信息^[12]，而日本HALQCD基于基态能谱的权重得到相互作用波函数^[13]。两种方案在判定双重子系统是否是束缚态、得到的信息是否有唯一性上尚有争议。

另一种研究多重子系统的思路，是考察原子核中的矩阵元与核子对应矩阵元的差别，也就是核介质效应。核介质效应中最广为人知的是EMC效应，即原子核的部分子分布函数(PDF)在 $x \sim 0.5$ 附近会比核子的PDF更低，而且显著依赖于核子数。甚至对于结合能，除了计算核与核子能谱的差异，也可以通过考察原子核质量分解中各项的核介质效应来探索结合能的场论起源。

此外，研究核结构所使用的散射信息、相互作用波函数以及强介质效应等研究方法，也可以应用于多夸克态研究，帮助实验寻找新的奇异粒子态，以及进一步确定奇异态的性质。

4 中国电子—离子对撞机(EicC)探测器概述

在对物质深层次结构的探索中，中国古代哲学家在几千年前用五行“金、木、水、火、土”作为基本元素来说明世界万物的形成及相互关系；而现在，中国核物理学家提议建造新一代的极化电子—离子对撞机EicC，以夸克和胶子作为基本自由度来窥探核子内部结构。作为新一代对撞机物理研究，无论是中国还是美国的电子—离子对撞机都是对物质深层次结构理解的无可替代的实验装置。图9显示了国际上电子—离子装置所处的质心系能量和亮度设计。刚刚完成能量升级的JLab主要针对价夸克在较大 x 区间的物理，而未来美国依托美国布鲁克海文国家实验室将要建设的EIC-US主要针对高能和小 x 物理。EicC则处于中间这一空白区域，主要针对中高能物理和海夸克，所以这两个对撞机是相辅相成但又缺一不可的。

这几个装置的运动学区间如图10所示。EIC-US能量高，EicC碰撞能量相对较低，直接后果就是对同一个物理观测量，在相同的Bjorken- x ，EIC-US集中在高 Q^2 区间而EicC在相对较低的 Q^2 区间(图10)，JLab处于研究价夸克结构的运动学区，EicC运动学区域是研究海夸克结构的最佳窗口，EIC-US是研究胶子的最佳装置。不同的 Q^2 区间对于物理测量有非常重要的作用：高 Q^2 利于确定物理根源，低 Q^2 利于测量跟非微扰有关的物理量。特别是很多跟质子自旋—轨道耦合有关的物理观测量在中间的 Q^2 区间能比较容易观测到。这有力并突出地证明了EicC的独特性和重要性。

为覆盖众多的物理课题，EicC探测器将设计为接近全立体角覆盖的探测谱仪。在粒子物理与核物理实验中，探测谱仪是常见的探测装置，通常围绕螺线管超导磁铁构建，利用多种探测模块

的有机组合，对反应过程进行全面的重构。图 11 (a)是对反应过程重构的示意图。高能粒子对撞产生的末态粒子在飞行过程中被探测装置逐步捕获。下面我们以后末态粒子被探测的顺序依次介绍：

(1) 在对撞点附近可配置多层的位置灵敏探测器(如硅微条、硅像素)用以探测对撞反应顶点以及末态粒子衰变的次级顶点，这被称为顶点探测器。顶点探测器通常设计很低的物质质量，在探测位置之余减少对于后续粒子动量、能量等信息测量的干扰；

(2) 在顶点探测器外侧，通常为谱仪的核心装置——径迹探测器，用以测量带电粒子的动量信息。谱仪中的螺线管超导磁铁为径迹探测器区域提供良好的均匀磁场。带电粒子在均匀磁场中做螺旋线运动，通过测量螺旋线参数，可以计算出带电粒子的动量。径迹探测器通常也设计为很低的物质质量，减少对后续粒子能量信息测量的干扰；

(3) 在径迹探测器外侧，通常配置粒子种类鉴别探测器，如飞行时间探测器(TOF)、切连科夫粒子鉴别探测器等。飞行时间探测器具有良好的时间分辨，用以精确测量粒子从对撞点飞行至 TOF 的时间 δT 。利用 δT 与内部的径迹探测器给出的动量信息，可以计算该粒子的质量信息用于区分粒子的种类。TOF 进行粒子鉴别的能力随着粒子的动量升高逐步减弱。当 TOF 不能满足粒子鉴别

的需求时，可以配置切连科夫粒子鉴别器扩展对于高动量区间的粒子鉴别能力。我们知道，光在介质中的速度比真空中的光速小，粒子在介质中的速度可能超过介质中的光速，在这种情况下会发生切连科夫辐射。产生的切连科夫光锥角度与粒子速度和介质折射率有关。在已知介质折射率的条件下，利用切连科夫辐射光锥角度，配合内部探测的粒子动量大小，可以有效地区分粒子种类；

(4) 在粒子鉴别探测器外侧，通常配置量能器，如电磁量能器和强子量能器。对于带电粒子，内部的动量测量配合粒子鉴别，足以给出粒子的能量信息。但是在部分区域，对于带电粒子的动量信息测量不够精确，额外的能量测量对于粒子信息的确定是有益的补充。对于中性粒子，如光子等，量能器的能量测量是重要的信息来源。

以上探测模块组成了 EicC 探测谱仪中心部分。针对 EicC 特殊的物理目标，探测谱仪还将在小角度配置探测单元。EicC 探测谱仪整体构造如图 11(b)所示。

5 中国电子—离子对撞机(EicC)重要物理展望

核子内部结构研究是目前人类探索物质基本组成的前沿领域。中国拟建造的极化电子—离子

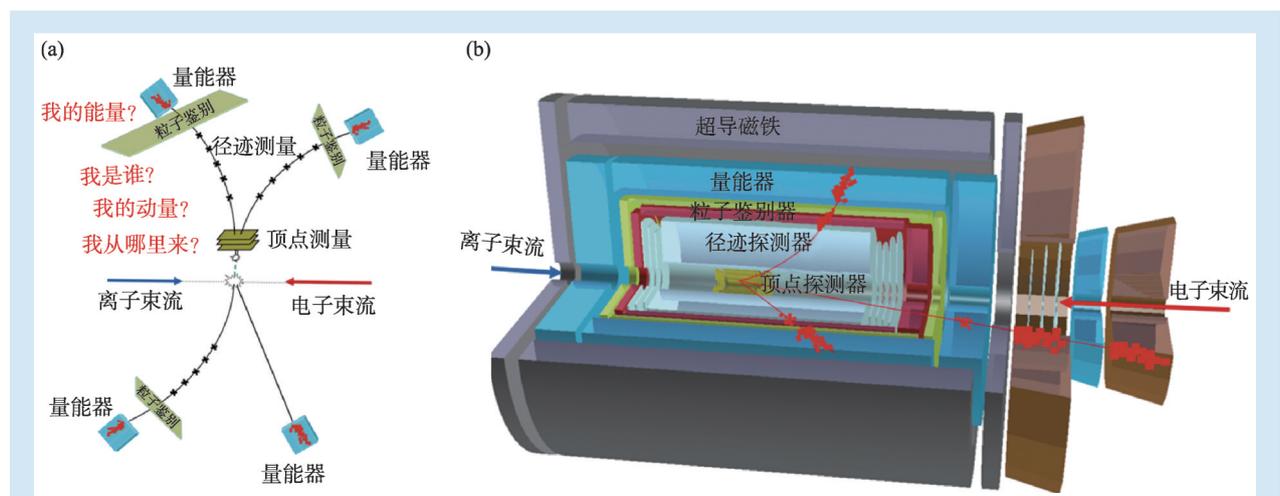


图 11 EicC 探测器设计示意图

对撞机项目，将是世界上在该能区研究核子内部结构的理想装置，拥有广阔的物理前景和丰富的物理亮点。下面将详细介绍EicC上的质子内部自旋结构、原子核介质效应、奇特强子态和质子质量起源等物理亮点。

5.1 质子内部自旋结构

在量子力学中，自旋是粒子所具有的内禀性质，质子和中子作为费米子具有 $1/2$ 自旋，利用此性质，人类发展了许多的实际应用，例如医学上被广泛使用的核磁共振成像技术。但是，核子 $1/2$ 的自旋如何构成，其复杂的内部结构到底如何，至今依然是一个未解之谜。如何在夸克和胶子的自由度层次来理解质子的自旋一直是一个重要的前沿科学问题。“质子自旋危机”之后，触发了大量相关的理论与实验工作，当前大家普遍对质子自旋结构的认识是，质子的自旋由夸克和胶子的自旋，以及夸克和胶子的轨道角动量组成，如图12所示。经过多年的不懈努力，在现有实验能够达到的运动学区间，人们得到夸克自旋对核子自旋的贡献约为30%，胶子自旋贡献约为20%—30%^[14]。剩下的部分，尤其是夸克和胶子的角动量对核子自旋的贡献，亟需电子—离子对撞机上的研究来解答。

在QCD因子化定理框架下，核子内部结构由部分子分布函数所描述。由费曼首先引入的传统的部分子分布函数(PDF)只包含核子内部夸克和胶子一维纵向运动或极化的信息。除了3个价

夸克，众多实验结果还发现质子内部的海夸克也具有非零的自旋分布。目前，一个亟须解决的问题是当前实验对海夸克自旋分布的测量结果不是特别精确。通过双极化的碰撞过程，在EicC上可以精确测量不同味道海夸克自旋分布，开展针对质子内部海夸克自旋分布的详尽的实验研究。此项研究也被称为核子一维纵向自旋结构的研究，可以回答一个基本问题：一个被极化的核子里，不同味道海夸克自旋方向沿着核子极化方向的概率。

在一维图像的基础上，为了获得更广泛更全面的核子内部结构信息，我们需要进一步推广部分子分布函数的概念，或者说，以一种新的视角来看待核子内部结构。其中最直接最自然的两种推广分别是：横动量依赖部分子分布函数(Transverse Dependent Parton Distributions, TMDs)与广义的部分子分布函数(Generalized Parton Distributions, GPDs)。除了描述部分子的纵向运动外，它们分别描述部分子在横向动量空间和核子横向平面上的分布，即三维部分子分布函数。

关于横动量依赖部分子分布函数，通过引入极化自由度，在扭度的领头幂次阶，人们可以定义8种夸克TMDs分布函数，分别描述不同极化核子(以核子动量方向作为参考：非极化，纵向极化，横向极化)里不同极化夸克的分布情况。极化依赖的TMDs分布函数包含了更加完备的有关核子内部结构的信息，特别是提供了一个研究部分子轨道角动量以及自旋—轨道角动量耦合的新渠道。其中有3种TMDs分布函数，非极化分布函数

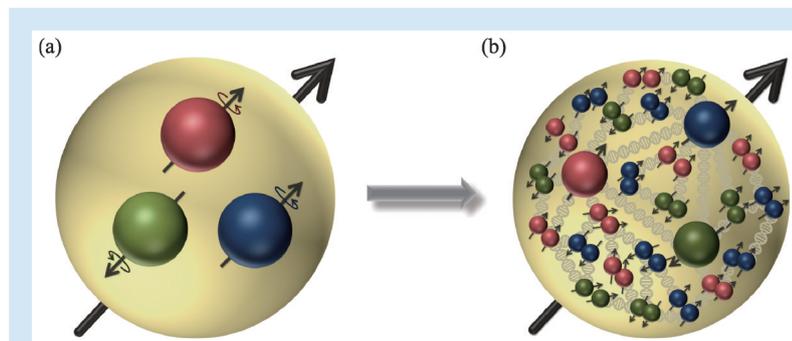


图12 (a)简单的夸克模型，质子自旋由夸克自旋组成。基于简单的夸克模型理解质子内部结构，出现了“质子自旋危机”；(b)质子具有复杂的夸克—胶子内部结构，夸克自旋只占质子自旋一部分

$f_1(x, k_\perp)$ 、螺旋度分布函数 $g_{1L}(x, k_\perp)$ 和横向度分布函数 $h_{1T}(x, k_\perp)$ ，对横动量积分后得到对应的一维部分子分布函数；包括Sivers函数在内的另外5种TMDs分布函数没有一维部分子分布函数与之相对应，它们分别描述部分子横动量与夸克自旋或核子自旋的关联。实验上往往通过极化半单举深度非弹性散射过程来测量TMDs相关的结构函数，以此来抽取TMDs分布函数。与深度

非弹性散射过程仅探测末态散射电子不同,半单举过程同时测量一个末态强子。

关于广义部分子分布函数,根据不同核子极化与夸克极化,在领头幂次阶,同样可以定义8类GPDs分布函数。在不同的动力学极限下,GPDs分别可以和一维部分子分布函数及核子的弹性散射因子联系起来。实验上往往通过深度虚康普顿散射过程(Deeply Virtual Compton Scattering, DVCS)来测量GPDs相关的结构函数:电子核子散射过程中,核子中的一个部分子参与了同虚光子的硬散射过程后发射一个光子又被吸收回核子,核子在散射末态保持完整。此过程一共探测3个末态粒子:散射电子、光子、反冲核子。

现有实验设施上虽然对三维部分子分布函数做了初步的研究,但由于在亮度或质心能量等方面的局限,无法对海夸克区域的TMDs和GPDs做高精度测量。EicC结合其高亮度,相对高的质心能量,和丰富多样的极化束流将是探索海夸克区域核子结构的理想机器。EicC与JLab和美国EIC相结合,可以对核子内海夸克、价夸克和胶子分布进行全面的高精度测量,实现对核子完整的三维成像。

5.2 原子核介质效应

1977年诺贝尔物理学奖获得者安德森(Philip W. Anderson)提出了“More is different”的论述,其中一个重要的观点是:大尺度和复杂的基本粒子集合体的行为,并不能按照少数基本粒子性质的简单外推来理解,在复杂性的每一个层次,都会有崭新的性质和内禀规律出现。这个描述对于原子核中部分子分布的研究同样适用。原子核是由不同数目的质子和中子构成,而核子具有复杂的内部结构。一个自然而然的问题是:随着核子数量的增多(量变),会不会带来部分子分布的不同(质变)? EMC效应的发现及后续实验的研究发现确实会引起“质变”,至少表明价夸克在原子核内的分布有别于其在自由核子内的分布,而且进一步发现EMC效应与核子数存在一定的关系。如

今,针对原子核内的海夸克和胶子部分子分布的测量十分不精确,例如尚未发现海夸克是否存在类似于EMC效应的核介质效应,而在更小 x 区间核介质效应的物理机制以及其与原子核结构的关联都亟需理论和实验的共同研究。EicC能对海夸克区相应的效应进行深入研究。

此外,在电子—原子核对撞中,被击中的夸克由于“夸克禁闭”会形成一个强子,此过程称为强子化过程。当强子化过程发生在真空中与核介质中时,会表现出不同的效应,例如部分子在核介质中强子化时会出现一定的能量损失,末态强子的横动量分布会变宽,等等。EicC上能系统地研究核环境中部分子强子化机制和能量损失效应,以及原子核介质的基本输运性质。

5.3 强子与奇特强子态

EicC电子—质子对撞过程中虚光子与质子的不变质量 W 为一个很宽的范围,覆盖粲夸克及底夸克偶素的产生能区。因此,对于含粲夸克和底夸克的强子及奇特强子态的产生及衰变的研究是EicC的重要物理目标之一。利用电生过程可以研究强子态的产生机制,极化束流也能用来确定它们的自旋、宇称等量子数。

相比现有实验装置上的研究,在EicC上开展奇特强子态的研究有独特的优势,尤其是对于可能的“五夸克态”。在LHC上,产生可能的“五夸克态”的散射振幅含有所谓的振幅运动学的奇异性贡献,这些贡献的存在对判断“五夸克态”的性质造成了困难。但在EicC上,由于产生机制的不同,含有隐粲的“五夸克态”可以直接产生,从而摆脱此类运动学奇异性的干扰,因此可以更清楚地了解或确认“五夸克态”的性质。

5.4 质子质量起源

人们不仅不理解质子自旋的来源,对质子的质量是怎么来的也不清楚。希格斯粒子的发现对于基本粒子质量起源有了答案,但是当人们试图

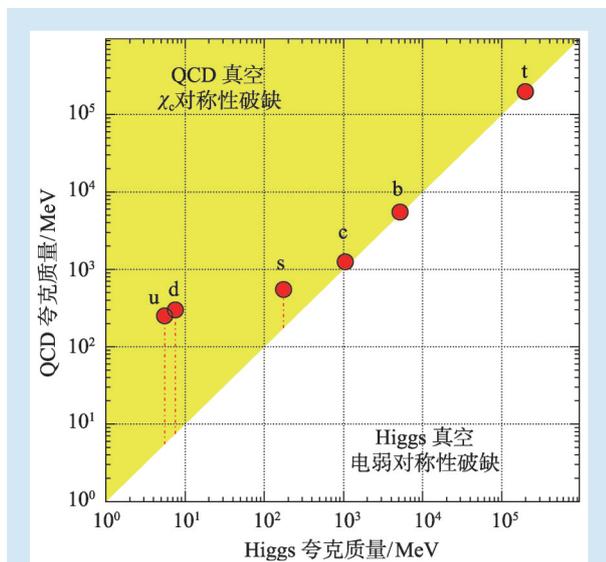


图13 QCD真空和Higgs真空中的夸克质量。由图可见，轻夸克(夸克u、d和s)的总质量来自QCD真空，换句话说就是来自QCD强相互作用^[1, 15]

理解核子质量时，夸克的等效质量与希格斯机制产生的质量有所偏离，如图13所示。从核子结构的研究表明核子是由夸克和胶子组成的，但是基本粒子胶子的质量为零，而且希格斯机制产生的轻味夸克质量之和远低于核子质量，这就说明核子的质量与夸克和胶子之间的强相互作用紧密相关。量子色动力学对于质子质量结构分解的研究表明胶子场的迹反常贡献至关重要。最近，有很多实验尝试通过阈值附近重夸克偶素的产生来探究该问题。与JLab实验在粲夸克束缚态 J/Ψ 阈值附近研究相比，EicC能区的设定在底夸克束缚态

参考文献

- [1] Tanabashi M *et al.* Phys. Rev. D, 2018, 98(3):030001
- [2] Yang Y B, Liang J, Bi Y J *et al.* Phys. Rev. Lett., 2018, 121: 212001
- [3] Accardi A *et al.* Eur. Phys. J. A, 2016, 52(9):268
- [4] 曹须等. 核技术, 2020, 43(2):20001
- [5] Lindley D. Physics, 2014, 7:81
- [6] https://www.desy.de/research/facilities_projects/hera/index_eng.html
- [7] Mallot G K, Voss R. Modern Physics A, 2015, 30: 1530052
- [8] Ashman J *et al.* Nuclear Physics B, 1989, 328(1):1
- [9] <https://www.jlab.org>

Υ 阈值附近。EicC和JLab的研究结果结合起来必将加深人们对质子质量起源的了解。

6 总结

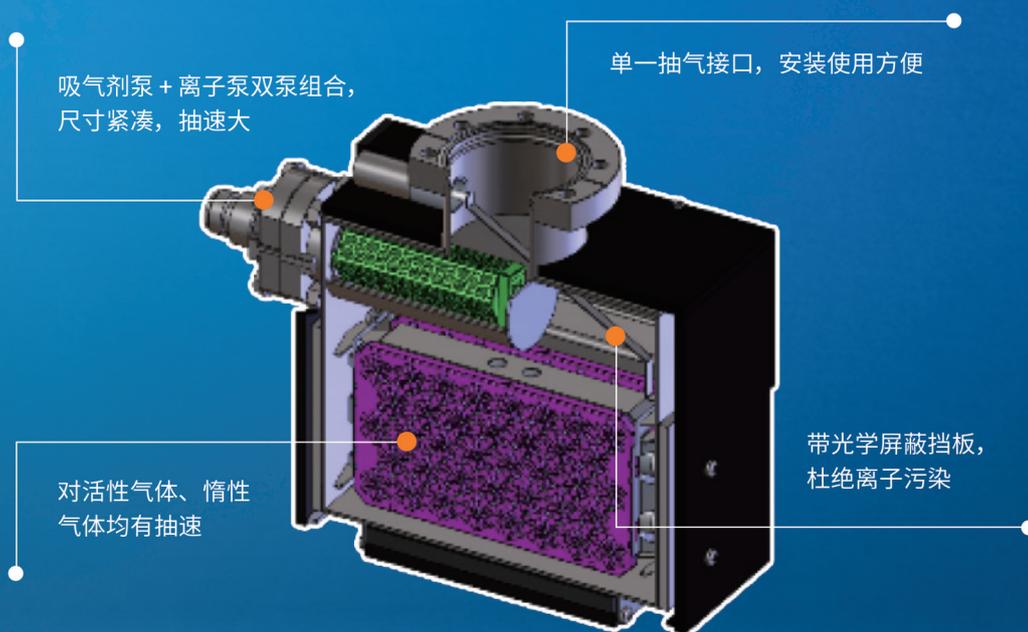
纵观人类的自然科学发展史，科学研究的革命与人类对世界认知观的发展息息相关。被誉为“近代自然科学之父之一”的伽利略同哥白尼、开普勒等人否定了古希腊托勒密提出的“地心说”，提出早期天体运动学说，改变了人类对物质运动和宇宙的认识。从人类开始正确认识星体的运动到今天，物理学经历了近五百年的发展，人类对宇宙的认识达到新的高度。可是，对于宇宙中可见物质基本组成成分——核子的认识，尤其是对其基本性质如质量和自旋的动力学起源问题，人类还知之甚少。人类对核子内部结构已有的认识在过去50年也经历了相当大的转变：从最开始简单的夸克图像发展到如今复杂的夸克—胶子动力学内部体系。如何更进一步，在夸克和胶子尺度上理解核子的基本特性，是中高能核物理研究的前沿方向之一。极化电子—离子对撞机是研究这些基本物理问题的理想实验平台，量子色动力学格点计算配合快速发展的超级计算机也能以一种独特的研究方式帮助我们揭示核子的内部世界。

致谢 衷心感谢许怒、陈剑平、赵红卫、赵政国老师在本文准备过程中提供的指导和帮助。

- [10] Aschenauer E C *et al.* The RHIC SPIN Program: Achievements and Future Opportunities. 2015, arXiv:1501.01220
- [11] <https://www.claymath.org/millennium-problems>
- [12] Davoudi Z. Springer Proc. Phys., 2020, 238:597
- [13] Iritani T, Aoki S, Doi T *et al.* JHEP, 2019, 03:007
- [14] Ball R D, Deshpande A. The proton spin, semi-inclusive processes, and a future Electron Ion Collider. 2018, arXiv:1801.04842
- [15] Zhu X, Bleicher M, Huang S *et al.* Physics Letters B, 2007, 647(5):366

安捷伦科技

CombiNEG 吸气剂复合型离子泵



安捷伦科技（中国）有限公司 真空产品热线：
800 820 6778（固定电话拨打） 400 820 6778（手机拨打）

了解更多，请扫描左侧二维码阅读介绍文章，或登陆安捷伦官方网站：www.agilent.com
(搜索“CombiNEG”)。